



## Prêts bilatéraux et réseaux sociaux

Philippe Caillou, Frédéric Dubut, Michèle Sebag

### ► To cite this version:

Philippe Caillou, Frédéric Dubut, Michèle Sebag. Prêts bilatéraux et réseaux sociaux. Modelling and learning in Social and Human Sciences MASHS 07, May 2007, Brest, France. inria-00167459

**HAL Id: inria-00167459**

**<https://inria.hal.science/inria-00167459>**

Submitted on 20 Aug 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

---

# Prêts bilatéraux et réseaux sociaux

## Quand la sous-optimalité conduit au bien-être collectif

**Philippe Caillou, Frederic Dubut et Michele Sebag**

*LRI, Université Paris Sud  
F-91405 Orsay France  
{caillou;dubut;sebag}@lri.fr*

---

*RÉSUMÉ. Dans cet article, nous étudions l'évolution d'un réseau social dans lequel des agents réalisent des prêts bilatéraux guidés par leurs préférences intertemporelles. Nous étudions l'évolution du graphe et de variables macroéconomiques et montrons notamment que le taux d'intérêt converge malgré une instabilité locale du graphe. Puis nous nous intéressons au bien être global de l'économie dans le cas où les agents disposent d'une stratégie pour déterminer leurs liens sociaux et montrons en particulier, dans le cas où les agents sont mortels, que la diversité des stratégies conduit à un accroissement du bien être collectif.*

*ABSTRACT. In this paper, our goal is to use Agent-Based Computational Economics and traditional economic methodology to study a path-dependent context: loan granting in a dynamic social network with intertemporal utility functions. We study the evolution of the graph and macro variables, and show that interest rate converge even if the network is locally unstable. We also study the impact of agent strategies on global welfare of the economy, and conclude that a diversity of strategies increases global welfare.*

*MOTS-CLÉS : réseaux sociaux, préférences intertemporelles, simulation, bien-être collectif*

*KEYWORDS: social network, intertemporal utility, simulation, global welfare.*

---

## 1. Introduction

La simulation de phénomènes économiques à l'aide de systèmes multi-agents (Agent-based Computational Economics - ACE) constitue une nouvelle approche «constructive» de l'analyse économique (Axelrod, 2004, Tesfatsion, 2002, Tesfatsion, 2006). Par rapport aux méthodes traditionnelles, elle est particulièrement adaptée afin d'analyser les mécanismes sous-jacents, l'émergence des équilibres (Epstein *et al.*, 1996), ou la dynamique de systèmes complexes tels que les réseaux socio-économiques (Bala *et al.*, 2003, M. Slikker, 2000, Carayol *et al.*, 2004).

Notre objectif est d'utiliser un modèle d'agent afin d'étudier les propriétés d'un réseau représentant un marché de fonds prêtables entre consommateurs. L'intérêt et l'originalité de notre travail se situe au niveau du contexte (les choix intertemporels du consommateur - qui impliquent une interdépendance entre les périodes), de la structure (les agents ne communiquent pas leurs préférences) et de l'objectif (qui inclut l'analyse du bien-être global, en complément des propriétés du graphe et de l'utilité individuelle). Cet article est organisé de la façon suivante : dans la section 2, nous présentons l'état de l'art, que nous discutons en présentant nos apports en section 3. Notre modèle est présenté brièvement en section 4 et les résultats obtenus en section 5. Nous concluons et donnons quelques perspectives de recherche en section 6.

## 2. État de l'art

Les travaux d'Epstein et Axtell sur l'émergence de sociétés à base d'agents informatiques (Epstein *et al.*, 1996) représentent un des fondements de l'ACE. A l'aide de leurs simulations, ils ont en particulier montré qu'il est possible d'atteindre un équilibre général de l'économie, et ce sans avoir recours à un commissaire priseur walrassien, uniquement grâce aux interactions d'agents. "La société est plus intelligente que les agents" : les agents n'ont aucune notion, ni même d'intérêt pour l'équilibre, et pourtant un prix d'équilibre émerge. Inversement, les auteurs ont également montré que cet équilibre n'émerge plus lorsque les agents meurent ou évoluent. Une présentation complète de l'ACE et de ses applications peut être trouvée dans (Tsfatsion, 2002, Tesfatsion, 2006).

Les réseaux sociaux constituent une application privilégiée de l'ACE. Leur étude, introduite en sciences sociales par les expériences de Milgram (Milgram, 1967) puis par l'étude de la "force des liens faibles" de Granovetter (Granovetter, 1973a, Granovetter, 1973b), s'est particulièrement développée depuis les travaux sur les petits mondes (small-world) (Watts *et al.*, 1998) et sur les réseaux à invariance d'échelle (scale-free) (Barabasi *et al.*, 1999). Jack-

son et Wolinsky (Jackson *et al.*, 1996) ont fourni un cadre d'analyse aux études économiques. Ils ont défini les concepts utilisés tels que la stabilité du réseau, son efficacité ou la fonction d'utilité de l'agent dans un réseau. De nombreux travaux ont suivi, utilisant à la fois l'analyse économique et l'ACE, notamment pour étudier les effets de règles de création de liens dans un contexte non coopératif (Bala *et al.*, 2003), dans un contexte coopératif (M. Slikker, 2000) ou dans un contexte mixte avec introduction de distances entre les agents (Carayol *et al.*, 2004).

### 3. Contributions et discussion

Notre étude porte sur un réseau d'agents consommateurs disposant d'une fonction d'utilité intertemporelle. Le maintien d'un lien de voisinage a un coût qu'au moins un des agents doit subir, sans quoi le lien disparaît. A chaque période, chaque agent optimise l'utilisation de son capital courant (qui résulte de tous ses prêts/emprunts précédents) pour maximiser son utilité en négociant de nouveaux prêts avec ses voisins. Dans les travaux tels que (Bala *et al.*, 2003, M. Slikker, 2000, Carayol *et al.*, 2004), la fonction d'utilité (définie par (Jackson *et al.*, 1996)) ne dépend que de la structure du graphe (c'est une application de  $\mathbb{G}$  dans  $\mathbb{R}$ ). Cela présente l'inconvénient de réduire le graphe à un support d'information (l'utilité ne dépend pas de ce qui circule) et de rendre les périodes quasi-indépendantes (le seul impact d'une période sur l'autre est la nouvelle structure du graphe). Dans notre application, l'utilité des agents ne dépend pas directement de la structure du graphe (mais des profits qu'ils en retirent grâce aux échanges) et les décisions d'une période sont influencées par les périodes précédentes (à travers les remboursements d'emprunts).

De même, pour plus de réalisme, notre protocole d'échange ne suppose pas que les agents transmettent leurs préférences (contrairement à des travaux tels que (Epstein *et al.*, 1996) où les prix sont calculés à partir des préférences des deux contractants). La non-transmission des préférences, outre le fait d'être plus réaliste (en particulier dans des contextes non coopératifs où les agents peuvent mentir), peut avoir un grand impact sur l'évolution des prix et donc sur la convergence du système.

Enfin, nous nous intéressons à l'impact du modèle d'agent et de sa stratégie sur le bien être global à long terme, en contraste avec des études de l'efficacité du réseau (Jackson *et al.*, 1996), qui ne prend pas en compte l'impact négatif des décisions courantes sur les périodes suivantes.

#### 4. Présentation du modèle

Nous allons tout d'abord présenter le modèle d'agent utilisé, puis le fonctionnement des interactions et enfin les fonctions d'utilité et de bien-être normalisées.

##### 4.1. Modèle d'agent

Chaque agent cherche à maximiser son utilité. Celle-ci provient de la consommation qu'il réalise à chaque période grâce à l'argent qu'il a reçu en salaire ou qu'il a emprunté. La forme de la fonction d'utilité d'un agent provient de la théorie économique des choix intertemporels (Fisher, 1930) :

$$U_i = \sum_{t=0}^n (p_i^t C_{i,t}^{b_i}) \quad [1]$$

Les différents paramètres d'un agent sont les suivants :

- **Préférence pour le présent**  $p_i$  ( $0 < p_i < 1$ ) : Toute chose égale par ailleurs, un agent préfère consommer à la période  $t$  plutôt qu'à la période  $t + 1$ .  $p_i$  correspond au taux d'actualisation de l'agent  $i$ . Plus  $p_i$  est élevé, plus l'agent  $i$  accepte de prêter à un taux faible.

- **Coefficient d'utilité**  $b_i$  ( $0 < b_i < 1$ ) : Suivant la théorie économique, nous considérons l'utilité procurée par un gain  $C$  comme étant de la forme  $C^{b_i}$ . Plus l'agent consomme, moins il éprouve de plaisir à consommer.

- **Salaire**  $R_i$  : Au début de chaque période, chaque agent reçoit un salaire constant  $R_i$ , qu'il peut utiliser pour rembourser des prêts, payer des liens, prêter ou consommer.

- **Sociabilité**  $s_i$  ( $0 < s_i < 1$ ) : A chaque période, chaque agent a une probabilité  $s_i$  de créer un nouveau lien. S'il n'a aucun voisin, il crée automatiquement un lien.

- **Durée de vie**  $M_i$  : Chaque agent a une durée de vie déterminée au delà de laquelle il est remplacé par un nouvel agent.

- **Stratégie**  $S_i$  : Un lien est conservé si au moins un agent accepte de payer son coût. Pour prendre sa décision, chaque agent applique une des 3 stratégies suivantes :

- **Optimisateur** : L'agent accepte de payer pour un lien si celui-ci a été rentable au cours des cinq dernières périodes (donc s'il a rapporté plus - en

terme d'utilité - que son coût). Cette stratégie est la stratégie rationnelle qui ne conserve que les liens utiles pour augmenter l'utilité de l'agent.

- **Passager clandestin** : L'agent n'accepte jamais de payer pour un lien. Cette stratégie a l'avantage de minimiser le coût payé pour les liens, mais l'inconvénient de ne pas optimiser le choix des voisins.

- **Investisseur** : L'agent accepte toujours de payer pour un lien. Cette stratégie a l'avantage de donner un large choix à l'agent pour réaliser des transactions, voire de lui permettre d'exploiter des voisins isolés (rôle d'intermédiaire financier). Mais elle a l'inconvénient d'avoir un fort coût en liens inutiles conservés.

A partir de ces paramètres, il est possible de définir les variables suivantes :

- **Voisinage**  $V_i$  : Ensemble des agents liés à l'agent  $i$  dans le réseau. Un agent ne peut réaliser des transactions qu'avec ses voisins.

- **Capital**  $K_i$  : Le capital de l'agent correspond à l'argent dont il dispose. Au début d'une période, il s'agit donc du salaire, moins ce qu'il doit rembourser (emprunts réalisés à la période précédente) plus ce qu'on lui rembourse (prêts accordés à la période précédente). Le capital varie au cours d'une période (il augmente lorsque des emprunts sont réalisés, diminue lorsque des prêts sont accordés).

- **Capital prévu**  $N_i$  : Il s'agit du capital disponible à la période suivante si l'agent consomme son capital présent et ne réalise plus de transactions. Si aucune transaction n'est réalisée, il s'agit du salaire  $R_i$ .

- **Taux limite**  $r_i$  : A partir de la fonction d'utilité, il est possible de calculer un taux limite au dessous duquel l'agent refuse de prêter et au dessus duquel il refuse d'emprunter.  $r_i$  n'est pas fixe au cours d'une période, car il dépend du capital courant  $K_i$  et prévu  $N_i$  qui varient à chaque prêt accordé ou reçu. L'agent  $i$  accepte de prêter une quantité  $q$  si le prêt accroît son utilité :

$$K_i^{b_i} + p_i N_i^{b_i} < (K_i - q)^{b_i} + p_i (N_i + (1 + r_i)q)^{b_i}$$

$$\Rightarrow r_i > \frac{p_i^{-\frac{1}{b_i}} (K_i^{b_i} + p_i N_i^{b_i} - (K_i - q)^{b_i})^{\frac{1}{b_i}} - N_i}{q} - 1 \quad [2]$$

- **Consommation**  $C_i$ . Un agent peut consommer à la fin de chaque période tout ou partie de son capital.

- **Utilité**  $U_i$ . L'utilité d'un agent provient de sa consommation actualisée (voir l'équation 1).

#### 4.2. *Modèle d'interaction*

La vie de chaque agent est découpée en périodes ; Les périodes des différents agents sont alignées ; pour chaque agent, une période donnée comprend au plus cinq phases : i) salaire et remboursement des emprunts, ii) négociation, iii) consommation, iv) modification du graphe, v) mort éventuelle.

Lors de la première phase, chaque agent touche son salaire  $R_i$ , paye les intérêts et rembourse les emprunts qu'il a contractés à la période précédente, et touche les remboursements et les intérêts des prêts qu'il a accordés.

La négociation se compose d'un nombre variable d'étapes. A chaque étape, chaque agent  $A_i$  détermine le meilleur taux auquel il peut prêter (resp. emprunter) une unité à l'un de ses voisins ; il est possible de ne conclure aucun prêt/emprunt. Pour chaque voisin  $A_j$ , il dispose d'un taux  $r_{ij}$  qu'il compare au taux limite  $r_i$  (eq. 2). Selon que  $r_{ij}$  est inférieur ou supérieur à  $r_i$ , l'agent  $A_i$  propose un prêt ou un emprunt à l'agent  $A_j$ , selon le protocole ci dessous :

```

MeilleurPret=0;
foreach  $A_j \in V_i$  t.q.  $r_{ij} > r_i$  do
    Proposer Pret(taux= $r_{ij}$ );
    if accepté then
        if  $r_{ij} > \text{MeilleurPret}$  then  $\text{MeilleurPret} = r_{ij}$ 
        Augmenter( $r_{ij}$ )
    else
        Diminuer( $r_{ij}$ )
    end
end
if  $\text{MeilleurPret} > 0$  then réaliser le prêt d'une unité au taux
MeilleurPret

```

Un algorithme similaire est utilisé pour réaliser une série de propositions d'emprunt.

Un agent accepte de recevoir un prêt si le taux proposé est inférieur à son taux limite et, s'il existe, au taux de l'emprunt qu'il a choisi lors de sa dernière série de propositions d'emprunt (et inversement pour la condition d'acceptation pour accorder un prêt).

Cette étape est itérée tant qu'au moins un échange a lieu.

Lors de la phase de consommation, chaque agent augmente son utilité en consommant la totalité ou une partie de son capital. Le montant optimal  $\hat{x}$  à épargner s'obtient en maximisant sa fonction d'utilité (il s'accorde à lui-même un prêt à taux zéro) :

$$\hat{x} = \frac{K_i - p_i^{\frac{1}{b_i-1}} N_i}{1 + p_i^{\frac{1}{b_i-1}}}$$

Lors de la phase de création de liens, chaque agent applique sa stratégie pour accepter ou refuser de payer les liens. Les liens qui ne sont pas payés sont supprimés. Si deux agents acceptent de payer pour un lien, le coût est réparti entre les deux. Une fois les liens détruits, chaque agent a une probabilité  $s_i$  de créer un nouveau lien avec un autre agent choisi aléatoirement. Un agent isolé crée automatiquement un nouveau lien.

Enfin, si des agents ont atteint leur espérance de vie, ils sont remplacés par de nouveaux agents (i.e. leurs paramètres  $p_i, b_i, R_i, s_i, M_i$  et  $S_i$  sont réinitialisés, le voisinage  $V_i$  demeure).

#### 4.3. Performance et bien-être collectif

Pour pouvoir comparer et agréger les performances des différents agents, il est nécessaire de normaliser les fonctions d'utilité ; sinon, les agents dont les paramètres  $p_i$  et  $b_i$  sont élevés sont avantagés par construction. Pour cela, nous considérons deux stratégies de référence : celle dite gloutonne solitaire, qui consiste à consommer tout son revenu à chaque période. L'utilité associée est :

$$U_{i,th} = \sum_{t=0}^{M_i} (p_i^t R_i^{b_i}) = R_i^{b_i} \frac{1 - p_i^{M_i+1}}{1 - p_i}$$

L'autre stratégie de référence, dite épargnant solitaire consiste à consommer un pourcentage  $\alpha$  de son revenu à chaque période de temps ( $\alpha \in \mathbb{R}$ ).

Il vient :

$$U_{i,epar} = \sum_{t=0}^{M_i} (p_i^t \alpha R_i^{b_i}) = \alpha^{b_i} (U_{i,th})$$

La normalisation proposée associe ainsi à chaque agent  $A_i$  la performance  $F_i$  définie par :

$$F_i = \left( \frac{U_i}{U_{i,th}} \right)^{\frac{1}{b_i}} - 1$$



Un agent qui consomme à tous les tours  $\alpha R_i$  aura une performance égale à  $\alpha - 1$ , quels que soient ses paramètres  $p_i$  et  $b_i$ . Par ailleurs, un agent est bénéficiaire par rapport à une stratégie gloutonne de consommation selon le simple critère  $F_i > 0$ .

Cette normalisation nous permet d'agréger les performances des agents pour définir le bien être global de la population simplement en réalisant la moyenne des fitness individuelles.

## 5. Résultats obtenus

Cette section décrit notre protocole expérimental, avant de considérer le cas parfait (section 5.2), puis la dynamique du réseau avec des agents à durée de vie infinie (section 5.3), puis finie (section ??).

### 5.1. Protocole expérimental

Nos simulations ont été réalisées à l'aide de la plateforme Moduleco (Phan, 2004). Pour des raisons de réalisme et de stabilité, les caractéristiques des agents (section 4.1) sont des variables aléatoires gaussiennes tronquées dont les moyennes  $\mu$  et écart-type  $\sigma$  sont donnés ci-dessous ; la transaction s'opère en imposant que la variable appartienne à l'intervalle  $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ . Les valeurs par défaut utilisées lors des simulations sont :

- Nombre d'agents  $n$  : 25 agents
- Préférence pour le présent  $p_i$  :  $N(0.8, 0.075)$
- Coefficient d'utilité  $b_i$  :  $N(0.5, 0.1)$
- Sociabilité  $s_i$  :  $N(0.05, 0.05)$
- Salaire  $R_i$  :  $N(20, 5)$
- Espérance de vie  $M_i$  :  $U(20, 100)$  (loi uniforme sur  $[20 : 100]$ )
- Coûts des liens  $c$  : 0.2
- Voisinage  $V_i$  : Au début de chaque simulation, chaque agent est relié à 2 voisins (la structure du graphe est celle d'un anneau, chaque agent étant relié à ses deux voisins)

Les différents résultats présentés ici sont des moyennes obtenues après 5 simulations avec des conditions initiales similaires.

## 5.2. Information parfaite

Dans le cas d'une information parfaite et gratuite, la théorie économique nous fournit un taux d'équilibre (qui est atteint grâce au commissaire priseur walrassien). Pour valider notre modèle, nous allons vérifier sa convergence vers le prix théorique dans le cas d'un réseau fixe où les agents sont tous connectés (le réseau forme une clique) avec des liens gratuits.

Le taux d'intérêt théorique peut être obtenu à partir de la fonction d'utilité de l'agent. On ne considère que des prêts dont l'échéance est la période suivante, l'utilité marginale par rapport à la quantité empruntée de l'agent peut donc s'écrire :

$$\frac{dU}{dq_i} = b_i(K_i + q_i)^{b_i-1} - b_i p_i(1 + \tau)(R_i - (1 + \tau)q_i)^{b_i-1}$$

Chaque agent optimise son utilité. Son utilité marginale est donc nulle à l'équilibre :

$$\frac{dU}{dq_i} = 0 \Leftrightarrow (K_i + q_i)^{b_i-1} = p_i(1 + \tau)(R_i - (1 + \tau)q_i)^{b_i-1}$$

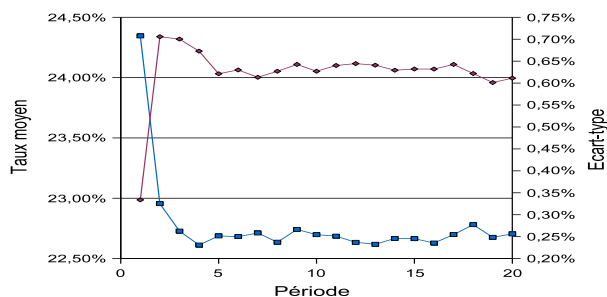
$$q_i = \frac{(p_i(1 + \tau))^{\frac{1}{b_i-1}} R_i - K_i}{1 + (p_i(1 + \tau)^{b_i})^{\frac{1}{b_i-1}}}$$

A l'équilibre, la somme des demandes s'annule. Le taux d'équilibre est donc la solution de l'équation :

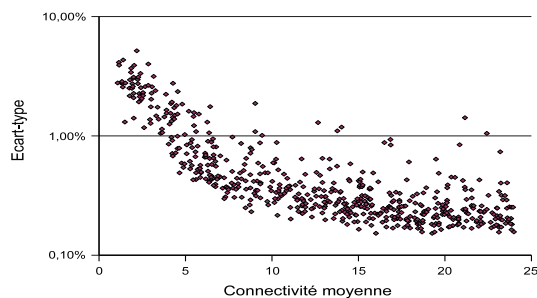
$$\sum_i Q_i = \sum_i \frac{(p_i(1 + \tau))^{\frac{1}{b_i-1}} R_i - K_i}{1 + (p_i(1 + \tau)^{b_i})^{\frac{1}{b_i-1}}} = 0$$

Pour nos paramètres expérimentaux, nous obtenons  $\tau = .24$ . La Fig.1 représente l'évolution de la moyenne et de l'écart-type des taux des prêts contractés lors de chaque période. On constate que le taux moyen converge bien vers le taux théorique. L'écart type résiduel ( $<.0025$  après 5 périodes) s'explique par la non atomicité des quantités échangées et des pas de variations des taux, et par le nombre limité d'agents.

Dans le cas d'un graphe non complet (mais toujours fixe), le taux d'intérêt continue de converger vers le taux théorique. Cette convergence est toutefois d'autant plus lente que la connectivité moyenne du graphe est faible. Comme



**Figure 1.** Moyenne et écart-type des taux utilisés lors des 20 premières périodes dans un graphe complet

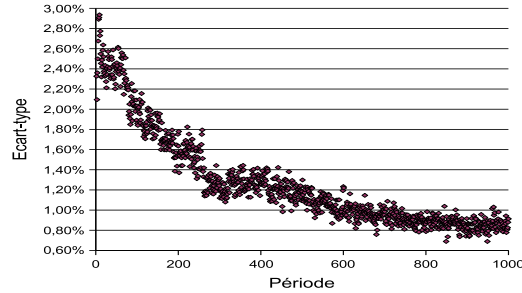


**Figure 2.** Ecart type des taux observé après 20 périodes pour différents niveaux de connectivité moyenne du graphe ; chaque point représente une expérience

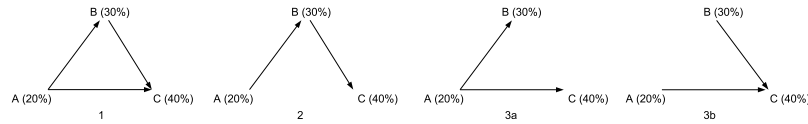
le montre la Fig.2, l'écart type des taux pratiqués après 20 périodes augmente fortement quand la connectivité moyenne du graphe devient faible ( $>.01$  quand la connectivité est inférieure à 4).

### 5.3. Réseau dynamique et agents immortels

Afin d'étudier la dynamique du réseau, nous commençons par considérer des agents immortels avec la stratégie *optimisateur* (qui semble la plus rationnelle car il ne conserve les liens que lorsqu'ils sont rentables). Lorsque tous les agents suivent cette stratégie, on constate que le taux d'intérêt continue de converger même si l'écart-type est beaucoup plus élevé que dans le cas précédent (voir Fig.3).



**Figure 3.** Evolution de l'écart type des taux observés avec des agents optimisateurs immortels



**Figure 4.** Configurations possibles avec 3 agents (représentés avec leurs taux limite de départ) ; l'orientation des liens représente le sens des prêts

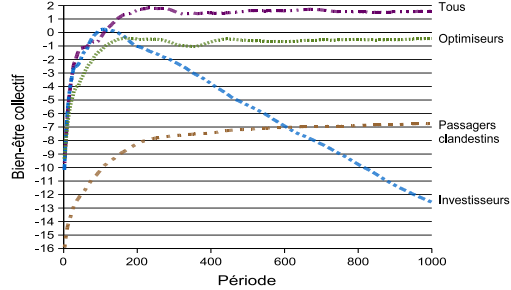
On constate par ailleurs que le graphe continue d'évoluer même si le taux converge. Cette absence de stabilisation du graphe peut s'expliquer par le choix (réaliste) qui a été fait selon lequel le prix d'échange ne repose pas sur la divulgation des préférences des agents. Le protocole d'échange qui en résulte fait que quelque soit la situation, la concurrence (ou l'absence de concurrence) fait évoluer les prix de façon telle qu'il est toujours rentable de détruire ou de créer un nouveau lien. Cette caractéristique peut être illustrée dans le cas de 3 agents.

Comme chaque agent crée automatiquement un lien s'il n'a pas de voisin, il n'y a que 3 configurations possibles (cf. Fig.4). Chacune de ces configurations est instable :

– 1 :Triangle (graphe complet). Deux cas possibles pour A :

- Si A peut prêter autant qu'il veut à C à un taux supérieur au taux limite de B  $r_B$ , A n'a aucun intérêt à prêter à B (il peut prêter à C à un meilleur taux). B n'a jamais intérêt à prêter à A (il peut toujours prêter à C à un meilleur taux), donc le lien AB est inutile et va être détruit.

- Si le taux limite d'emprunt  $r_C$  de C diminue progressivement de telle sorte qu'il devient inférieur au taux de B  $r_B$ , A va prêter à B et à C (à un taux



**Figure 5.** Bien-être de la population dans le cas d'une stratégie unique ou d'un mélange de stratégie avec des agents à durée de vie limitée

inférieur à  $r_B$ ). Dans ce cas, B n'aura aucun intérêt à prêter à C, car celui-ci refusera des emprunts à un taux supérieur à  $r_B$  (il peut les obtenir à un meilleur taux auprès de A). Le lien BC va devenir inutile et être détruit.

– 2 : Ligne. A prête à B au taux  $\tau_{AB} < r_B$ . B prête à C à un taux  $\tau_{BC} > r_B$ . Lorsque A ou C va créer le lien AC, celui-ci va être stable car A va accepter de prêter à C à un taux  $\tau_{BC} - \epsilon$  qui sera toujours plus élevé (et donc plus rentable) que  $\tau_{AB}$ . Nous retournons au cas 1.

– 3a et 3b : Etoile. Dans le cas 3a, en l'absence de concurrence, A va progressivement augmenter ses taux de prêt. Le lien BC va devenir rentable et donc stable lorsque B ou C va le créer. Et nous retournons au cas 1. Le cas 3b est identique car symétrique (C va progressivement diminuer le taux des emprunts qu'il propose).

Dans le cas d'un réseau de plus de 3 agents, l'instabilité est accentuée par des effets de cascade : la création/destruction d'un lien influence la rentabilité/stabilité des autres.

#### 5.4. Agents mortels et bien-être collectif

L'étude du bien-être collectif des agents montre qu'individuellement, la stratégie *optimisateur* est la meilleure, que ce soit avec des agents mortels ou immortels (voir Fig.5 pour le mortel). Ce résultat est logique dans la mesure où les investisseurs n'ont personne à exploiter lorsqu'il n'y a que des investisseurs (la connectivité moyenne du graphe augmente alors progressivement, le coût total des liens devenant rapidement très élevé). De même, les passagers clandestins ne peuvent profiter de personne lorsque c'est la seule stratégie présente (l'évolution du graphe est alors aléatoire).

La stratégie *optimisateur* seule est supérieure à une mixité de stratégie dans le cas d'agents à durée de vie infinie, mais il est intéressant de noter que ce n'est plus vrai lorsque les agents sont mortels (cf. Fig.5). La supériorité de la mixité peut s'expliquer par deux facteurs. Tout d'abord, les passagers clandestins accélèrent la réorganisation du réseau en favorisant la destruction de liens (ce qui les conduit régulièrement à recréer des liens car ils n'ont plus aucun voisin). De façon symétrique, les investisseurs acceptent de payer pour des liens inutiles à court terme. Or, ces liens peuvent se révéler très utiles lorsqu'un agent meurt pour réorganiser rapidement le réseau. Cette utilisation peut être interprétée comme une vision dynamique de la "force des liens faibles" (Granovetter, 1973a). Les liens sont faibles car peu utiles de façon immédiate et à court terme, mais ils se révèlent très utiles pour l'économie sur le long terme.

## 6. Conclusion et perspectives

Cette analyse d'un jeu socio-économique d'échange de fonds dans un réseau avec des agents autonomes nous conduit à plusieurs conclusions. Tout d'abord, nous avons montré que la convergence rapide vers le taux d'intérêt prédit par la théorie économique était possible avec un protocole d'échange ne nécessitant pas de transmission de préférences entre agents, y compris dans le cas d'un réseau incomplet. Dans le cas dynamique, nous avons constaté que l'instabilité permanente du graphe n'était pas incompatible avec la convergence de variables telles que le taux d'intérêt. Enfin, dans le cas d'agents à durée de vie limitée, nous avons montré qu'il était avantageux pour le bien être collectif d'avoir une variété de stratégie plutôt qu'une seule, fût-elle la meilleure.

Ce travail peut être étendu en introduisant une mémoire plus importante dans les agents et en accroissant la persistance des échanges. Introduire des stratégies prenant en compte cette connaissance pour fixer les taux proposés pourrait permettre au graphe de se stabiliser (l'effet sur la convergence et sur le bien être global reste toutefois incertain). Une deuxième extension directe de ce travail serait d'analyser la répartition optimale des stratégies proposées (ou autres) pour maximiser le bien être collectif.

## 7. Remerciements

Nous tenons à remercier Denis Phan pour avoir mis à disposition son simulateur ModulEco. Ce travail a été partiellement financé par le programme IST de la Communauté Européenne, dans le cadre du réseau d'excellence PAS-CAL, IST-2002-506778.

## 8. Bibliographie

- Axelrod R., « Advancing the art of simulation in the social sciences », *Advances in Complex Systems*, vol. 7, n° 1, p. 77-92, 2004.
- Bala V., Goyal S., « A Noncooperative Model of Network Formation », *Japanese Journal for Management Information Systems*, 2003.
- Barabasi A.-L., Albert R., « Emergence of scaling in random networks », *Science*, vol. 286, p. 509-512, 1999.
- Carayol N., Roux P., « Behavioral foundations and equilibrium notions for social network formation processes », *Advances in Complex Systems*, vol. 7, n° 1, p. 77-92, 2004.
- Epstein J., Axtell R., *Growing Artificial Societies. Social Science From the Bottom Up*, The MIT Press, 1996.
- Fisher I., *The Theory of Interest*, Macmillan, 1930.
- Granovetter M., « Strength of Weak Ties », *American Sociological Review*, 1360-1380, May, 1973a.
- Granovetter M., « The Strength of Weak Ties : A Network Theory Revisited », *Sociological Theoryp*, 203-233, Sept, 1973b.
- Jackson M., Wolinsky A., « A Strategic Model of Social and Economic Networks », *Journal of Economic Theory*, vol. 71, p. 44-74, 1996.
- M. Slikker A. v. d. N., « Network formation models with costs for establishing links », *Review of Economic Design*, vol. 5, n° 3, p. 333-362, 2000.
- Milgram S., « The small-world problem », *Psychology today*, vol. 2, p. 60-67, 1967.
- Phan D., « From Agent-Based Computational Economics towards Cognitive Economics », in , N. J. Bourguin P. (ed.), *Cognitive Economics*, Handbook of Computational Economics, Springer Verlag, 2004.
- Tesfatsion L., « Agent-Based Computational Economics : Growing Economies From the Bottom Up. », *Artificial Life*, vol. 8, n° 1, p. 55-82, 2002.
- Tesfatsion L. S., « A Constructive Approach to Economic Theory », in , K. L. Judd, , L. S. Tesfatsion (eds), *Handbook of Computational Economics*, vol. 2 Agent-Based Computational Economics of *Handbooks in Economic Series*, North-Holland, 2006.
- Watts D., Strogatz S., « Collective dynamics of 'small-world' networks », *Nature*, vol. 393, p. 440-442, 1998.